



**Europäisches Patentamt**  
**European Patent Office**  
**Office européen des brevets**



(11) **EP 1 154 278 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

**(43) Veröffentlichungstag:**  
**14.11.2001 Patentblatt 2001/46**

(51) Int Cl.7: **G01R 15/24**

(21) Anmeldenummer: 01810364.8

**(22) Anmeldetag: 12.04.2001**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU**  
**MC NL PT SE TR**  
 Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL LT LV MK RO SI**

(72) Erfinder: Bohnert, Klaus  
5452 Oberrohrdorf (CH)

**(74) Vertreter: ABB Patent Attorneys  
c/o ABB Business Services Ltd. (SLE-I)  
Haselstrasse 16/699  
5401 Baden (CH)**

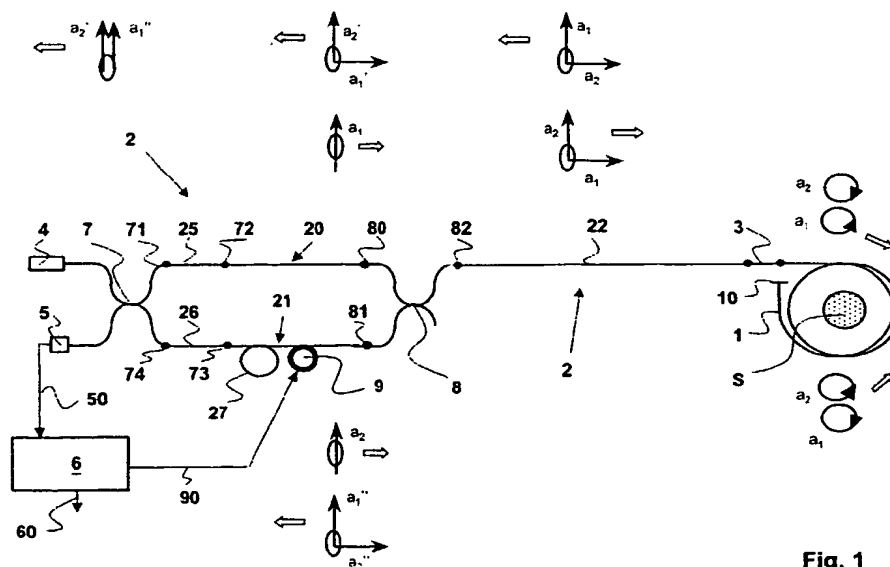
(30) Priorität: 05.05.2000 DE 10021669

(71) Anmelder: **ABB RESEARCH LTD.**  
**8050 Zürich (CH)**

**(54) Faseroptischer Stromsensor**

(57) Ein faseroptischer Stromsensor weist ein Reflexionsinterferometer mit einer faseroptische Zuleitung (2) und eine spulenförmige optische Sensorfaser (1) auf, wobei die Sensorfaser (1) an einem ersten Ende mit der faseroptischen Zuleitung (2) verbunden und an einem zweiten, freien Ende mit einem Reflektor (10) versehen ist. Die faseroptische Zuleitung (2) weist zwei Faserzweige (20,21) auf, welche einen detektorseitigen und einen sensorseitigen polarisationserhaltenden Koppler (7,8) miteinander verbinden. Ein Phasenmodulator (9) zur Modulation von differentiellen Phasen zwei-

er in der Zuleitungsfaser (2) propagierender polarisierter Wellen ist in einem dieser zwei Faserzweige (20,21) angeordnet, wobei er die differentielle Phase zweier parallel zueinander polarisierter Wellen moduliert. In einem der zwei Faserzweige (20) ist ferner ein Mittel zur Änderung der Polarisationsrichtung (80) vorhanden, so dass in einem dem sensorseitigen Koppler (8) anschliessenden Segment (22) der Zuleitungsfaser (2) optische Wellen mit orthogonal linearen Polarisationen propagieren. Dadurch lassen sich die Vorteile des Reflexionsinterferometers mit denjenigen eines Sagnac-Interferometers verbinden.



**Fig. 1**

## Beschreibung

### Technisches Gebiet

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf einen faseroptischen Stromsensor mit einem Reflexionsinterferometer gemäss Oberbegriff des Patentanspruches 1.

### Stand der Technik

**[0002]** Ein gattungsgemässer faseroptischer Stromsensor ist aus DE-A-4'224'190 und G. Frosio et al., "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor", Applied Optics, Vol. 33, No. 25, Seite 6111-6122 (1994) bekannt. Er weist eine spulenförmig gewickelte, magneto-optisch aktive Sensorfaser auf, welche einen Stromleiter umschliesst. An einem Ende ist die Sensorfaser verspiegelt, am anderen Ende ist sie über ein Phasenverzögerungselement mit einer polarisationserhaltenden optischen Zuleitungsfaser verbunden, über welche sich Licht in die Sensorfaser einbeziehungsweise auskoppeln lässt. Die Zuleitungsfaser propagiert dabei orthogonal linear polarisierte optische Wellen. Mit Hilfe von faseroptischen Phasenverzögerern werden diese vor Eintritt in die Sensorspule in zwei zirkular polarisierte Wellen umgewandelt, wobei die zwei zirkular polarisierten Wellen einen zueinander entgegengesetzten Drehsinn aufweisen. Nach Durchlaufen der Sensorspule werden die zwei zirkularen Wellen am Ende der Spule reflektiert, wobei sie mit vertauschtem Polarisationsinn durch die Spule zurücklaufen.

**[0003]** Fliesst nun ein Strom durch den Stromleiter, so bewirkt das magnetische Feld des Stroms eine differentielle Phasenverschiebung zwischen den beiden zirkularen optischen Wellen. Dieser Effekt wird magneto-optischer oder Faraday-Effekt genannt. Durch das zweimalige Durchlaufen der Spule akkumulieren die Wellen eine differentielle Phasenverschiebung von  $\Delta\Phi_S = 4 V N l$ , wobei V die Verdet-Konstante der Faser, N die Anzahl der Faserwindungen in der Spule und I den Strom durch den Stromleiter bezeichnet.

**[0004]** Die zirkularen Wellen werden beim Austritt aus der Spule in den Phasenverzögerern wieder in orthogonale linear polarisierte Wellen verwandelt und über die Zuleitungsfaser zu einem Detektionssystem geführt. Die durch den Strom verursachte Phasenverschiebung lässt sich detektieren, indem die zwei reflektierten linear polarisierten Wellen in einem an die Zuleitungsfaser anschliessenden Polarisator zur Interferenz gebracht werden.

**[0005]** Um eine grössere Auflösung bei der Detektion der differentiellen Phasenverschiebung zu erhalten, muss der effektive Arbeitspunkt des Interferometers in einem linearen Bereich seiner kosinusförmigen Interferenzfunktion liegen. Um dies zu erreichen, wird die differentielle Phase der beiden interferierenden linear polarisierten Wellen moduliert. Hierfür ist die Zuleitungs-

faser mit einem Modulator wirkverbunden. Als Modulatoren wird im allgemeinen eine auf Resonanz betriebene, piezoelektrische Keramik eingesetzt, um welche einige Wicklungen der Zuleitungsfaser gewickelt sind. Der Modulator moduliert die Doppelbrechung der Faser und somit die differentielle Phase der beiden Wellen. Die Frequenz der Modulation liegt typischerweise im Bereich zwischen 100 kHz und einigen MHz und wird unter anderem durch die Länge der Faserverbindung zur Sensorfaser, das heisst der Zuleitungsfaser, bestimmt.

**[0006]** In der Praxis ist es jedoch schwierig, die differentielle Phase zweier orthogonaler optischer Wellen mit Hilfe einer piezoelektrischen Keramik mit ausreichend grosser Amplitude zu modulieren. Im Stand der Technik wird deshalb zu einer Kombination von Massnahmen gegriffen, um die erwünschte Amplitude zu erreichen. So wird im Bereich des Modulators die ansonsten im allgemeinen mit einem elliptischen Kern versehene Zuleitungsfaser durch einen Abschnitt einer empfindlicheren Faser mit stress-induzierter Doppelbrechung ersetzt. Es wird eine hohe Modulatorspannung verwendet und als piezoelektrische Keramik wird ein Hohlzylinder anstelle eines scheibenförmigen Elementes eingesetzt. Diese Massnahmen führen jedoch zu diversen Nachteilen: So weisen empfindlichere Fasern mit stress-induzierter Doppelbrechung eine grössere Temperaturabhängigkeit auf, sind auf dem Markt nicht stark verbreitet, sie sind teuer und lassen sich zudem teilweise schlecht mit anderen Fasertypen spleissen. Ferner stellt eine Faser mit stress-induzierter Doppelbrechung eine zusätzliche Komponente im Sensor dar, was die Komplexität des Aufbaus erhöht. Die hohe Modulatorspannung führt zu einer starken mechanischen Beanspruchung der Keramik und beeinträchtigt somit die Stabilität wie auch die Lebensdauer. Schliesslich weist die hohlzylinderförmige Keramik eine kleinere Resonanzfrequenz auf als die scheibenförmige, was in einer geringen nutzbaren Bandbreite des Sensors resultiert. Zudem muss eine längere Zuleitungsfaser verwendet werden, da die Länge der Modulationsfrequenz angepasst sein muss.

**[0007]** Aus G. Frosio et al., "All-fiber Sagnac Current Sensor", Proc. Opto 92, Seite 560564 (1992) und EP-A-0'856'737 ist ein faseroptischer Stromsensor mit einem anderen Interferometer, einem sogenannten Sagnac-Interferometer, bekannt. Im Sagnac-Interferometer breiten sich in einem geschlossenen optischen Kreis zwei gegenläufige Lichtwellen aus. In der Sensorspule sind die beiden Wellen zirkular und in den beiden Verbindungsfasern zur Spule linear polarisiert. Die linearen Polarisationen sind dabei parallel zueinander ausgerichtet. Für die Modulation der differentiellen Phase zweier gegenläufiger Wellen mit paralleler Polarisation, ist eine im Vergleich zu orthogonal polarisierten Wellen 100 bis 1000fach geringere piezo-elektrische Deformation des Modulators notwendig, so dass die obengenannten Nachteile des Reflexionsinterferometers nicht

vorhanden sind. Der Sensor mit dem Sagnac-Interferometer weist jedoch den Nachteil auf, dass er gegenüber mechanischen Erschütterungen anfällig ist. Dies ist u. a. eine Folge der endlichen Laufzeit der Wellen im optischen Kreis, da die beiden Wellen den Ort einer Störung zu unterschiedlichen Zeiten erreichen, und der inhärenten Empfindlichkeit des Sagnac-Interferometers auf Rotationsbewegungen.

[0008] Die Phasenmodulation der gegenläufigen Wellen im Sagnac-Stromsensor erfolgt völlig analog zur Modulation der gegenläufigen Wellen in einem Faserkreisel zur Messung von Drehgeschwindigkeiten, wie sie in H.C. Lefevre, "fiber-optic gyroscopes", Fiber-Optic Sensors, J. Dakin and B. Culshaw Editors, Vol. 2, Chapter 11, Artech House 1989, beschrieben ist.

### Darstellung der Erfindung

[0009] Es ist Aufgabe der Erfindung, einen faseroptischen Stromsensor mit einem Reflexionsinterferometer der eingangs genannten Art zu schaffen, welches auf einfache Art und Weise modulierbar ist.

[0010] Diese Aufgabe löst ein Stromsensor mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

[0011] Im erfindungsgemässen Stromsensor wird die differentielle Phase zweier gegenläufiger, parallel linear polarisierter Wellen moduliert. Um dies zu ermöglichen, weist ein Abschnitt einer faseroptischen Zuleitung des erfindungsgemässen Stromsensors zwei Faserzweige auf, wobei die zwei Faserzweige zwei Faserkoppler miteinander verbinden. In den beiden Faserzweigen breiten sich linear polarisierte Wellen aus, die in einem der Koppler in orthogonale Polarisationen übergeführt werden, bevor sie zum spulenförmigen optischen Sensorelement gelangen. Die von der Sensorspule zurückkehrenden orthogonalen Polarisierungen werden im zweiten Koppler wieder auf die beiden Faserzweige aufgeteilt und im ersten Koppler wieder vereinigt. Es sind Mittel vorhanden, um die Polarisationsrichtung bezüglich der Faserachsen in einem der Faserzweige zu ändern. Die Modulation erfolgt in einem oder beiden der Faserzweige.

[0012] Da die Trennung der faseroptischen Zuleitung lediglich über eine kurze Distanz erfolgt, findet praktisch keine Beeinflussung des Signals durch mechanische Erschütterungen statt.

[0013] In den zwei Faserzweigen lassen sich Wellen mit linearer Polarisation parallel zur langen und kurzen Achse des Faserkerns propagieren. Vorzugsweise verfügen jedoch mindestens eine, in einer ausgewählten Ausführungsform sogar beide Faserzweige über einen Polarisator, so dass im Faserzweig nur eine einzige Polarisationsrichtung vorhanden ist.

[0014] Das Mittel zur Änderung der Polarisationsrichtung bezüglich der Achsen des Faserkerns ist vorzugsweise ein 90°-Spleiss, der in einen der zwei Faserzweige zwei Fasersegmente verbindet.

[0015] In einer bevorzugten Ausführungsform ist ein

Detektor und eine Lichtquelle mit demselben Fasersegment eines Faserkopplers verbunden. Diese Anordnung ist insbesondere zur Messung von Gleichströmen geeignet.

[0016] Der erfindungsgemässe Stromsensor lässt sich auf einfache Art und Weise multiplexen, indem mehrere spulenförmige Sensorfasern von derselben faseroptischen Zuleitung versorgt werden. Hierfür verfügt die faseroptische Zuleitung über eine entsprechende Anzahl von weiteren Faserzweigen, welche in Serie mit den ersten zwei Faserzweigen angeordnet sind.

[0017] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen gehen aus den abhängigen Patentansprüchen hervor.

### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0018] Im folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen:

- Figur 1 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemässen Stromsensors in einer ersten Ausführungsform;
- Figur 2 einen erfindungsgemässen Stromsensor in einer zweiten Ausführungsform;
- Figur 3 einen erfindungsgemässen Stromsensor in einer dritten Ausführungsform;
- Figur 4 einen erfindungsgemässen Stromsensor in einer vierten Ausführungsform;
- Figur 5 einen erfindungsgemässen Stromsensor in einer fünften Ausführungsform und
- Figur 6 einen erfindungsgemässen Stromsensor in einer sechsten Ausführungsform.

### Wege zur Ausführung der Erfindung

[0019] Figur 1 zeigt einen faseroptischen Stromsensor mit einem Reflexionsinterferometer. Eine Sensorfaser 1 ist spulenförmig um einen Stromleiter S gewickelt. Sie weist vorzugsweise einen runden Kernquerschnitt auf und ist vorzugsweise aus Quarzglas gefertigt. Ein erstes Ende der Sensorfaser 1 ist mit einer faseroptischen Zuleitung 2 verbunden. Ein zweites Ende ist mit einem Reflektor 10 versehen. Im allgemeinen ist der Reflektor 10 durch eine Verspiegelung des zweiten Faseresendes gebildet. Die faseroptische Zuleitung 2 besteht im wesentlichen und bis auf die Ausnahme der erfindungsgemässen Aufteilung der Zuleitung, aus einer doppelbrechenden optischen Faser, welche mindestens abschnittsweise polarisationserhaltend ausgebildet. Vorzugsweise weist sie zur Erzeugung der Doppelbrechung einen elliptischen Kernquerschnitt auf. Die Verwendung einer stress-induzierten doppelbrechenden Faser ist jedoch möglich. Die Verbindung der faseroptischen Zuleitung 2 mit der Sensorfaser 1 erfolgt über ein Phasenverzögerungselement 3, wobei hierfür vorzugsweise ein  $\lambda/4$  Phasenverzögerungs-Faserseg-

ment eingesetzt ist.

[0020] Ferner ist eine Lichtquelle 4 vorhanden, deren Licht durch die Fasern übermittelt wird. Als Lichtquelle eignen sich insbesondere solche mit einer kleinen Kohärenzlänge, insbesondere eine Superlumineszenzdiode, eine unter der Laserschwelle betriebene Laserdiode, eine LED oder eine breitbandige Faserlichtquelle. Der Sensor verfügt über einen Detektor 5, insbesondere eine Photodiode, welche durch die Sensorfaser und die faseroptische Zuleitung propagiertes und zur Interferenz gebrachtes Licht detektiert. Dieser Detektor 5 ist über eine Detektorsignalleitung 50 mit einem Signalprozessor 6 verbunden, welcher das Sensorsignal über eine Sensorsignalleitung 60 an eine nicht dargestellte Auswerteelektronik übermittelt.

[0021] Erfindungsgemäss trennt sich die faseroptische Zuleitung 2 während einer bestimmten Strecke in zwei Faserzweige 20,21 auf, welche somit parallel geschaltet sind. Die Faserzweige 20,21 verbinden einen detektionsseitigen und einen sensorseitigen polarisationserhaltenden Koppler 7,8 miteinander. Im hier dargestellten bevorzugten Ausführungsbeispiel sind diese zwei Koppler 7,8 Faserkoppler mit einem elliptischen Kern. Es ist jedoch auch möglich, andere Arten von Kopplern zu verwenden. Ferner sind in beiden Faserzweigen 20,21 Polarisatoren 25,26 vorhanden, wobei diese so gerichtet sind, dass ihre Polarisationsrichtungen parallel zu einer der Hauptachsen der Zweige 20, 21 liegen. Vorzugsweise sind sie parallel zur langen oder langsamen Hauptachse des Kerns des Faserzweiges 20,21 gerichtet.

Es ist jedoch auch möglich, sie parallel zur kurzen oder schnellen Hauptachse zu richten oder je eine zur langen und zur kurzen Achse auszurichten.

[0022] In diesem Beispiel sind Faserpolarisatoren eingesetzt, die Verwendung anderer Polarisatoren ist jedoch möglich. Die Faserzweige 20,21 sind detektorseitig über Spleisse 72,73 mit den Polarisatoren 25,26 und diese über Spleisse 71,74 mit dem detektorseitigen Kopplern 7 verbunden. Sensorseitig sind die Faserzweige 20,21 ebenfalls über Spleisse 80, 81 mit dem sensorseitigen Koppler 8 verbunden. Desgleichen ist ein sensorseitiges Segment 22 der faseroptischen Zuleitung 2 über einen Spleiss 82 mit dem Koppler 8 verbunden.

[0023] Einer der zwei Faserzweige 20,21 weist ferner vorzugsweise ein Verzögerungselement, hier in Form einer Faserschleife 27, auf. Ebenfalls an einem der zwei Faserzweige 20,21 ist ein Phasenmodulator 9 vorhanden, welcher über eine Modulationssignalleitung 90 mit dem Signalprozessor 6 verbunden ist. Im hier dargestellten Ausführungsbeispiel sind sowohl Phasenmodulator 9 wie auch Verzögerungselement 27 auf demselben Faserzweig 21 angeordnet. Als Phasenmodulator 9 ist vorzugsweise ein piezo-elektrischer Modulator eingesetzt, wobei ein Teil des Faserzweigs 21 um einen piezo-elektrischen Körper des Modulators gewickelt ist. Es ist jedoch auch möglich, andere Modulatoren einzu-

setzen, insbesondere einen integriert-optischen Modulator, welcher auf dem elektro-optischen Effekt in einem Wellenleiter basiert.

[0024] In Figur 1 sind die einzelnen Polarisationsrichtungen bezüglich der Achsen des Faserkerns der in den Fasern propagierenden Wellen mit schmalen Pfeilen dargestellt. Zudem geben breite Pfeile die Ausbreitungsrichtung der Wellen an. Licht, welches von der Lichtquelle 4 emittiert wird, wird im detektorseitigen Faserkoppler 7 auf die zwei Faserzweige 20,21 der faseroptischen Zuleitung 2 in eine erste und eine zweite Welle  $a_1$ ,  $a_2$  aufgeteilt. Das Teilungsverhältnis ist dabei vorzugsweise 1:1. In den beiden faseroptischen Polarisatoren 25,26 wird das Licht linear polarisiert und propagiert dann durch den restlichen polarisationserhaltenden Faserzweig 20,21 zum sensorseitigen Koppler 8. Die in den Faserzweigen 20,21 sich in Richtung Sensorfaser 1 ausbreitenden optischen Wellen weisen dabei Polarisationsrichtungen auf, welche in diesem Beispiel parallel zur grossen Hauptachse des Faserkerns ausgerichtet sind. Die entsprechenden Pfeile sind in Figur 1 mit  $a_1$  und  $a_2$  bezeichnet.

[0025] Die Wellen werden nun so in die zwei Eingänge des sensorseitigen Kopplers 8 eingekoppelt, dass ihre Polarisationen nach dem Verlassen des Kopplers, d. h. im Segment 22 der faseroptischen Zuleitung 2 orthogonal zueinander ausgerichtet sind. Dazu wird eine Welle mit der Polarisation parallel zur langen und die andere parallel zur kleinen Achse der Kopplereingänge eingekoppelt. Hierfür ist zwischen einem Faserzweig, hier dem ersten Faserzweig 20, und einem Koppler, hier dem sensorseitigen Koppler 8, ein Mittel vorhanden, um die Polarisationsrichtung bezüglich der Faserachsen zu verändern. Licht, das vor Durchlaufen dieses Mittels parallel zur langen Achse schwingt, schwingt nach dem Durchlaufen parallel zur kurzen Achse, und Licht, das vor Durchlaufen dieses Mittels parallel zur kurzen Achse schwingt, schwingt nach dem Durchlaufen parallel zur langen Achse.

[0026] Im Beispiel gemäss Figur 1 ist dieses Mittel der Spleiss 80 zwischen Faserzweig 20 und Faserkoppler 8, welcher als 90°-Spleiss ausgebildet ist. Das heisst, die Fasern des ersten Faserzweigs 20 und des Faserkopplers 8 sind am Spleiss 80 so zusammengefügt, dass die langen Hauptachsen ihrer Kerne mindestens annähernd orthogonal ausgerichtet sind. Der Spleiss 81 hingegen, welcher den zweiten Faserzweig 21 mit dem Faserkoppler 8 zusammenfügt, ist ein 0°-Spleiss, das heisst, die langen Hauptachsen der Kerne der Fasern sind mindestens annähernd parallel zueinander ausgerichtet. In dem dem Koppler 8 anschliessenden sensorseitigen Segment 22 der faseroptischen Zuleitung 2 laufen dann zwei Wellen mit orthogonalen linearen Polarisationen. Dies ist in Figur 1 ebenfalls mit Pfeilen dargestellt. Beim anschliessenden Durchlaufen des faseroptischen  $\lambda/4$ -Verzögererelementes werden sie in links- und rechtszirkuläre Wellen verwandelt, wie in Figur 1 sichtbar ist. Die zirkulären Wellen durchlaufen die Sen-

sorfaser 1, werden am Spulenende 10 reflektiert, vertauschen dabei ihre Polarisationszustände, laufen durch die Spule zurück und werden im  $\lambda/4$ -Verzögerer wieder in orthogonale lineare Wellen verwandelt, deren Polarisation jetzt senkrecht zur Polarisation der entsprechenden Wellen der Vorwärtsrichtung steht.

**[0027]** Im sensorseitigen Koppler 8 wird jede der beiden orthogonalen Wellen auf die beiden Faserzweige 20,21 aufgeteilt, wobei sich die erste Welle  $a_1$  in die zurücklaufenden Wellen  $a_1'$  und  $a_1''$  aufteilt und die zweite Welle  $a_2$  in zurücklaufende Wellen  $a_2'$  und  $a_2''$ . Dabei schwingen die zurücklaufenden Wellen  $a_1'$  und  $a_2'$  in den beiden Faserzweigen 20,21 parallel zu den vorwärts laufenden Wellen  $a_1$  und  $a_2$ . Diese zurücklaufenden Wellen  $a_1''$  und  $a_2''$  sind aus Wellen entstanden, welche in ihrer Vorwärtsausbreitung sich im jeweils anderen Faserzweig bewegt haben. Die zurücklaufenden Wellen  $a_1'$  und  $a_2'$ , welche in den beiden Faserzweigen 20,21 orthogonal zu den vorwärts laufenden Wellen  $a_1$  und  $a_2$  schwingen, sind aus Wellen entstanden, welche sich bei ihrer Vorwärtsausbreitung im jeweils gleichen Faserzweig bewegt haben. Die zurücklaufenden Wellen  $a_1''$  und  $a_2''$  können die Faserpolarisatoren 25,26 passieren, werden im detektionsseitigen Koppler 7 zur Interferenz gebracht und werden schliesslich im Detektor 5 detektiert. Die dazu orthogonalen Wellen  $a_1'$  und  $a_2'$  werden in den Polarisatoren 25,26 blockiert.

**[0028]** Die beiden Faserzweige 20,21 weisen vorzugsweise einen optischen Längenunterschied  $\Delta L$  auf, was in den hier beschriebenen Beispielen durch das Verzögerungselement 27 und/oder durch den den Piezokristall umschlingenden Teil des Fasersegmentes erreicht wird. Dieser optische Längenunterschied  $\Delta L$  ist dabei grösser als die Kohärenzlänge der Lichtquelle 4. Falls die rücklaufenden Wellen  $a_1'$  und  $a_2'$  in den Polarisatoren 25,26 nicht vollständig ausgelöscht werden, so können sie aufgrund ihres Gangunterschiedes von insgesamt  $2\Delta L$  im detektionsseitigen Koppler 7 nicht interferieren und damit keinen störenden Beitrag zum Messsignal liefern. Durch Wahl einer Lichtquelle mit kleiner Kohärenzlänge lässt sich auch die Verzögerungsstrecke minimieren.

**[0029]** Die am detektionsseitigen Koppler 7 interferierenden Wellen  $a_1''$  und  $a_2''$  haben im stromlosen Fall einen Phasenunterschied  $\Delta\phi$  von Null. Der Arbeitspunkt des Interferometers liegt dann in einem Maximum der kosinusförmigen Interferenzfunktion. Die Empfindlichkeit des Interferometers ist hier sehr klein. Der Phasenmodulator moduliert nun die differentielle Phase der interferierenden Wellen, das heisst  $a_1''$  und  $a_2''$ , analog zu einem Faserkreisel, welche in der Beschreibungseinleitung erwähnt worden ist. Es handelt sich dabei um eine dynamische Phasenmodulation, bei welcher eine nicht-reziproke Phasenmodulation durch Modulation von gegenläufigen Wellen erreicht wird. Der effektive Arbeitspunkt wird so gewählt, dass er im linearen Bereich der Kosinusfunktion liegt. Vorzugsweise werden die Schwingungsfrequenz und -amplitude des Phasenmo-

dulators so gewählt, dass die Amplitude  $\eta_0$  der differentiellen Phasenmodulation 1.84 rad beträgt und damit der Position des Maximums der Besselfunktion erster Ordnung entspricht.

**[0030]** Die Faserzweige 20, 21 mit den Kopplern 7, 8 bilden einen optischen Kreisel, das heisst, eine Drehung der Anordnung führt ebenfalls zu einer differentiellen Phasenverschiebung zwischen den interferierenden Wellen  $a_1''$  und  $a_2''$ . Die Phasenverschiebung ist umso grösser, je grösser die von den beiden Zweigen 20, 21 umschlossene Fläche ist. Um solche störenden Signale zu vermeiden, werden die Faserzweige 20,21 vorzugsweise so verlegt, dass die von ihnen umschlossene Fläche möglichst klein, im Idealfall gleich Null ist.

Der gleiche Effekt tritt auch in den Faserwindungen auf, die auf den Piezomodulator 9 aufgewickelt sind bzw. in der Verzögerungsschleife 27. In diesem Fall kann man rotationsbedingte Phasenverschiebungen kompensieren, indem zum Ausgleich eine Segment der Faserzweige 20 oder 21 mit umgekehrtem Drehsinn aufwickelt. Die Anzahl der Windungen und die eingeschlossene Fläche werden so gewählt, dass eine möglichst vollständige Kompensation erreicht wird.

**[0031]** In Figur 2 ist ein zweites Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Stromsensors dargestellt. Der Aufbau ist im wesentlichen derselbe wie im vorherigen Beispiel, es ist jedoch nur in einem hier im zweiten Faserzweig 21 ein Faserpolarisator 26 vorhanden. Dadurch propagiert im ersten Faserzweig 20 eine dritte Welle  $b_1$ , wie dies in der Figur anhand der Polarisationsrichtungen der Wellen erkennbar ist.

Es erreichen nun vier rücklaufende Wellen, nämlich  $a_1''$ ,  $a_2'$ ,  $b_1'$  und  $a_1'$  den Detektor. Dabei sind die Wellen  $a_1''$  und  $a_2'$  kohärent. Aus ihrer Interferenz wird wiederum das Sensorsignal gewonnen. Die rücklaufende dritte Welle  $b_1'$  hat bezüglich  $a_1''$  und  $a_2'$  einen Gangunterschied von  $\Delta L$  und interferiert deshalb nicht mit  $a_1''$  und  $a_2'$ , sondern liefert lediglich einen konstanten Intensitätsuntergrund. Die rücklaufende erste Welle  $a_1'$  hat zwar keinen Wegunterschied im Vergleich zu  $b_1'$ , liefert aber wegen ihrer orthogonalen Polarisation ebenfalls nur einen phasenunabhängigen Intensitätsuntergrund.

**[0032]** In Figur 3 ist ein drittes Ausführungsbeispiel dargestellt, welches gar keine Polarisatoren in den Faserzweigen 20,21 aufweist, so dass eine vierte Welle  $b_2$  vorhanden ist. In den Faserzweigen 20,21 werden beide Polarisierungen angeregt und zur Sensorfaser 1 gesendet, so dass insgesamt acht rücklaufende Wellen  $a_1''$ ,  $a_2'$ ,  $b_1'$ ,  $b_2'$ ,  $a_1'$ ,  $b_2'$ ,  $b_1''$ ,  $a_2''$  am Detektor 5 eintreffen. Jeweils vier Wellen  $a_1''$ ,  $a_2'$ ,  $b_1'$ ,  $b_2'$  sind parallel zur langen und vier Wellen  $a_1'$ ,  $b_2'$ ,  $b_1''$ ,  $a_2''$  zur kurzen Hauptachse des Faserkerns. Die beiden Wellen  $a_1''$  und  $a_2'$  mit der Polarisation parallel zur langen Achse sind kohärent. Aus ihrer Interferenz ergibt sich ein Sensorsignal. Die Wellen  $b_2'$  und  $b_1'$  haben bezüglich  $a_1''$  und  $a_2'$  Gangunterschiede von  $+\Delta L$  bzw. von  $-\Delta L$  und liefern deshalb keinen Signalbeitrag. Der Modulator 9 hat zudem ihre differentielle Phase nicht oder nur mit sehr klei-

ner Amplitude moduliert. Die beiden Wellen  $b_1''$  und  $b_2''$  mit der Polarisation parallel zur kurzen Achse sind ebenfalls kohärent. Aus ihrer Interferenz ergibt sich damit ebenfalls ein Signalbeitrag. Die Wellen  $a_2''$  und  $a_1''$  haben bezüglich  $b_1''$  und  $b_2''$  wieder Gangunterschiede von  $+\Delta L$  bzw. von  $-\Delta L$  und liefern deshalb keinen Signalbeitrag. Die relativen Signalbeiträge von  $a_1''$  und  $a_2''$  bzw. von  $b_1''$  und  $b_2''$  sind in der Regel unterschiedlich, da der Modulator 9 die differentielle Phase der beiden Wellenpaare aufgrund ihrer unterschiedlichen Polarisationsrichtung mit unterschiedlicher Amplitude moduliert. Falls erwünscht, können die Wellen einer der beiden Polarisationsrichtungen vor dem Detektor mit einem, hier nicht dargestellten, Polarisator blockiert werden.

**[0033]** In den bisher beschriebenen Ausführungsformen ist der Detektor 5 an einem von der Lichtquelle 4 getrennten Faserende des detektionsseitigen Faserkopplers 7 angeordnet. Es ist jedoch auch, wie in Figur 4 dargestellt, möglich, die zurückkehrenden, interferierenden Wellen an einem mit der Lichtquelle 4 verbundenen Eingangsarm des Kopplers 1 zu detektieren. In diesem Falle ist der Detektor 5 hinter der Lichtquelle 4 und somit an demselben Ein- bzw. Ausgang des Kopplers 7 angeordnet. Diese Anordnung ist für alle bisher beschriebenen Ausführungsformen möglich.

Bei dieser Anordnung wird der detektionsseitige Koppler 7 in reziproker Weise von den vorwärtslaufenden wie auch von den rücklaufenden Wellen durchlaufen, d. h. wenn man den Koppler analog zu einem Strahlteiler betrachtet, wird jede Welle am Koppler einmal reflektiert und einmal transmittiert. Die gesamte differentielle Phasenverschiebung der Wellen am detektionsseitigen Koppler 7 ist damit exakt Null. Bei den Ausführungsformen gemäss den Figuren 1 bis 3 durchlaufen die Wellen den detektionsseitigen Koppler 7 dagegen in nicht-reziproker Weise. Eine Welle wird zweimal reflektiert, die andere zweimal transmittiert. Daraus kann sich eine differentielle Phasenverschiebung ergeben, die nicht von der Phasenverschiebung, welche ein Gleichstrom erzeugt, unterschieden werden kann. Die Ausführungsform gemäss Figur 4 ist deshalb insbesondere zur Messung von Gleichströmen geeignet.

**[0034]** Figur 5 zeigt in einem fünften Ausführungsbeispiel eine Modifikation des vierten. Hier ist zwischen der Lichtquelle 4 und dem detektionsseitigen Koppler 7 ein dritter Koppler 7', vorzugsweise ebenfalls ein Faserkoppler, angeordnet. Diese Konfiguration erlaubt wiederum reziproke optische Wege für die beiden interferierenden Wellen. Wie in den Ausführungsbeispielen gemäss den Figuren 1 bis 3 werden die Wellen jedoch mit einem von der Lichtquelle 4 getrennten Detektor 5 detektiert. Ein Vorteil im Vergleich zum vierten Ausführungsbeispiel besteht darin, dass der Detektor 5 nicht dem direkten Laserlicht ausgesetzt ist. Der eher störende Gleichstromuntergrund im Photodiodensignal ist damit wesentlich niedriger.

**[0035]** Weitere Varianten der obengenannten Ausführungsbeispiele sind möglich. So lassen sich Modulator,

Verzögerungsschleife und Polarisatoren beliebig auf den zwei Faserzweigen verteilen. Das Mittel zur Veränderung der Polarisation lässt sich auch an anderen Stellen anordnen. So lässt sich anstelle des anhand der Figur 1 beschriebenen Spleisses 80 auch einer der anderen dargestellten Spleisse 71, 72, 26, 73, 81 als 90° Spleiss gestalten. Es können auch mehrere der Spleisse als 90°-Spleiss ausgeführt sein. Ihre Zahl muss nur ungerade sein.

10 Ferner lassen sich in beiden Faserzweigen Phasenmodulatoren einsetzen. Dies hat den Vorteil, dass nochmals eine Verringerung der notwendigen Modulationsstärke erzielt wird.

Ferner lässt sich anstelle einer spulenförmigen Sensorfaser ein spulenförmiges integriert optisches Sensorelement einsetzen. Die Spule kann in beiden Fällen aus lediglich einer einzigen Windung bestehen.

**[0036]** In Figur 6 ist in einem sechsten Ausführungsbeispiel ein Multiplexing des Sensors dargestellt. Es sind mehrere, hier zwei spulenförmige Sensorfaser 1,1' vorhanden, welche mit derselben faseroptischen Zuleitung 2 verbunden sind. Die Zuleitungsfaser 2 weist hierfür eine entsprechende Anzahl, hier zwei, weitere Faserzweige 23,24 auf, welche in Serie mit den zwei ersten Faserzweigen 20,21 angeordnet sind. Hier ist ein dritter Faserzweig 23 mit einem ersten Ausgang des sensorseitigen Faserkopplers 8 und ein vierter Faserzweig 24 mit einem zweiten Ausgang verbunden. Somit ist jede Sensorfaser 1,1' mit einem zusätzlichen Faserzweig 23,24 verbunden. Die zusätzlichen Faserzweige 23,24 haben unterschiedliche Längen, so dass die Signale der beiden Sensorfasern 1,1' aufgrund der verschiedenen Laufzeiten der entsprechenden optischen Wellen unterschieden werden können. Um ein solches Zeitmultiplexing zu ermöglichen, ist die Emission der Lichtquelle 4 entweder gepulst oder frequenzmoduliert, wobei im zweiten Fall die Modulationsfrequenz als Funktion der Zeit beispielsweise sägezahnartig verändert wird.

40 Die beiden Sensorfasern 1,1' sind vorzugsweise mit einer unterschiedlicher Zahl von Faserwindungen ausgestattet. Die Sensorfaser mit wenigen Windungen lässt sich dann vorzugsweise für Messung hoher Ströme bei Kurzschlüssen einsetzen, so dass sie eine Schutzfunktion übernimmt. Die andere Sensorfaser mit der grösseren Windungszahl lässt sich zur genauen Messung der relativ kleinen Ströme im Normalbetrieb verwenden.

**[0037]** Der erfindungsgemässe Stromsensor kombiniert die Vorteile eines Reflexionsinterferometers mit denjenigen eines Sagnac-Interferometers, indem zwar lediglich eine einzige Faser als Zu- und Rückleitungsfaser dient, diese jedoch über eine kurze Strecke zwei Zweige aufweist und somit die Verwendung von parallel linear polarisierten Wellen ermöglicht.

55

## Bezugszeichenliste

[0038]

S Stromleiter

a <sub>1</sub>	erste optische Welle
a' <sub>1</sub>	rücklaufende erste optische Welle
a <sub>2</sub>	zweite optische Welle
a' <sub>2</sub>	zurücklaufende zweite optische Welle
b <sub>1</sub>	dritte optische Welle
b' <sub>1</sub>	zurücklaufende dritte optische Welle
b <sub>2</sub>	vierte optische Welle
b' <sub>2</sub>	zurücklaufende vierte optische Welle
1	Sensorfaser
10	Reflektor
2	Zuleitungsfaser
20	erster Faserzweig
21	zweiter Faserzweig
22	sensorseitiges Segment
23	dritter Faserzweig
24	vierter Faserzweig
25	Faserpolarisator
26	Faserpolarisator
27	Verzögerungsschleife
3	Phasenverzögerungselement
4	Lichtquelle
5	Detektor
50	Detektorsignalleitung
6	Signalprozessor
60	Sensorsignalleitung
7	detektorseitiger Faserkoppler
71,72,73,74	Spleiss
7'	dritter Koppler
8	sensorseitiger Faserkoppler
80,81,82	Spleiss
9	Phasenmodulator
90	Modulationssignalleitung

## Patentansprüche

- Optischer Stromsensor mit einem Reflexionsinterferometer, welches eine faseroptische Zuleitung (2) und einem spulenförmigen optischen Sensorelement (1) aufweist, wobei das Sensorelement (1) mit einem ersten Ende mit der faseroptischen Zuleitung (2) verbunden und an einem zweiten, freien Ende mit einem Reflektor (10) versehen ist, mit mindestens einem Phasenmodulator (9) zur Modulation von differentiellen Phasen zweier in der faseroptischen Zuleitung (2) propagierender polarisierten Wellen und einem Detektor (5), **dadurch gekennzeichnet, dass die faseroptische Zuleitung (2) zwei Faserzweige (20,21) aufweist, welche einen detektorsei-**

tigen und einen sensorseitigen Koppler (7,8) miteinander verbinden, dass der mindestens eine Phasenmodulator (9) in einem dieser zwei Faserzweige (20,21) angeordnet ist,

wobei er die differentielle Phase zweier gegenläufiger parallel zueinander polarisierter Wellen moduliert, und dass ein Faserzweig (20) mit einem Mittel zur Änderung der Polarisationsrichtung (80) versehen ist, so dass in einem dem sensorseitigen Koppler (8) anschliessenden Segment (22) der Zuleitungsfaser (2) optische Wellen mit orthogonal linearen Polarisierungen propagieren.

- Stromsensor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Faserzweig (20,21) einen Polarisator (25,26) zur Erzeugung einer linearen polarisierten optischen Welle aufweist.**

- Stromsensor nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass beide Faserzweige (20,21) einen Polarisator (25,26) aufweisen zur Erzeugung von optischen Wellen mit parallel zueinander gerichteten linearen Polarisierungen.**

- Stromsensor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass das Mittel zur Änderung der Polarisationsrichtung ein 90°-Spleiss (80) ist.**

- Stromsensor nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass der 90°-Spleiss (80) zwischen dem sensorseitigen Koppler (8) und dem Faserzweig (20) angeordnet ist.**

- Stromsensor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor (5) und eine die optischen Wellen erzeugende Lichtquelle (4) an einem gemeinsamen Ein- beziehungsweise Ausgang des detektorseitigen Kopplers (7) angeordnet sind.**

- Stromsensor nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass zwischen Lichtquelle (4) und detektorseitiger Koppler (7) ein dritter Koppler (7') angeordnet ist, und dass die Lichtquelle (4) und der Detektor (5) an verschiedenen Ein- beziehungsweise Ausgängen des dritten Kopplers (7') angeordnet sind.**

- Stromsensor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass mehrere spulenförmige Sensorelemente (1,1') vorhanden sind und dass die faseroptische Zuleitung (2) weitere Faserzweige (23,24) aufweist, welche in Serie mit den erstgenannten Faserzweigen (20,21) angeordnet sind, wobei jede spulenförmige Sensorelemente (1,1') mit einem der weiteren Faserzweige (23,24) verbunden ist.**

- Stromsensor nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass die weiteren Faserzweige (23,24)**

unterschiedliche Länge aufweisen.

10. Stromsensor nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die spulenförmigen Sensorelemente (1,1') eine unterschiedliche Anzahl von Faserwindungen aufweisen. 5

10

15

20

25

30

35

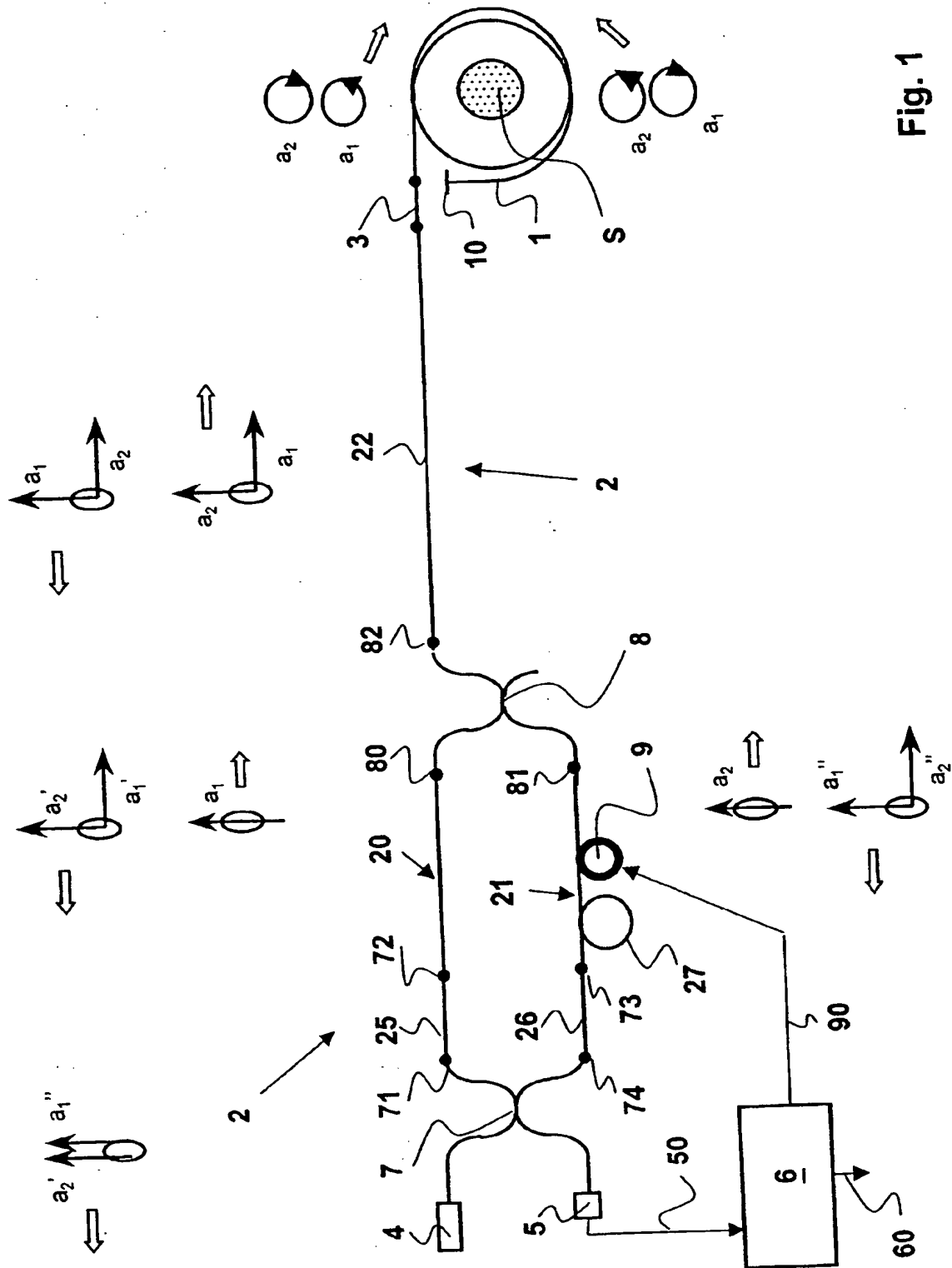
40

45

50

55





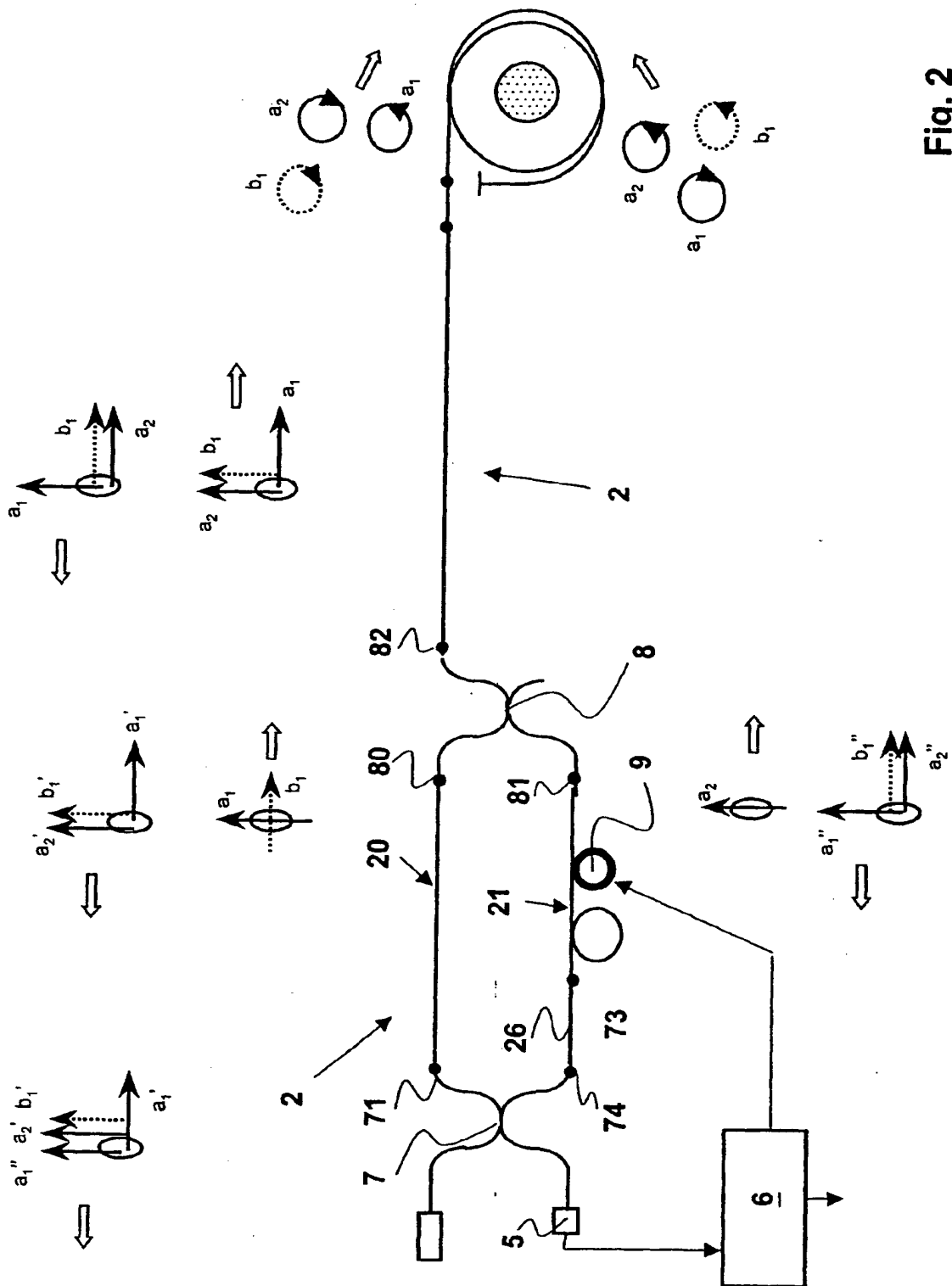
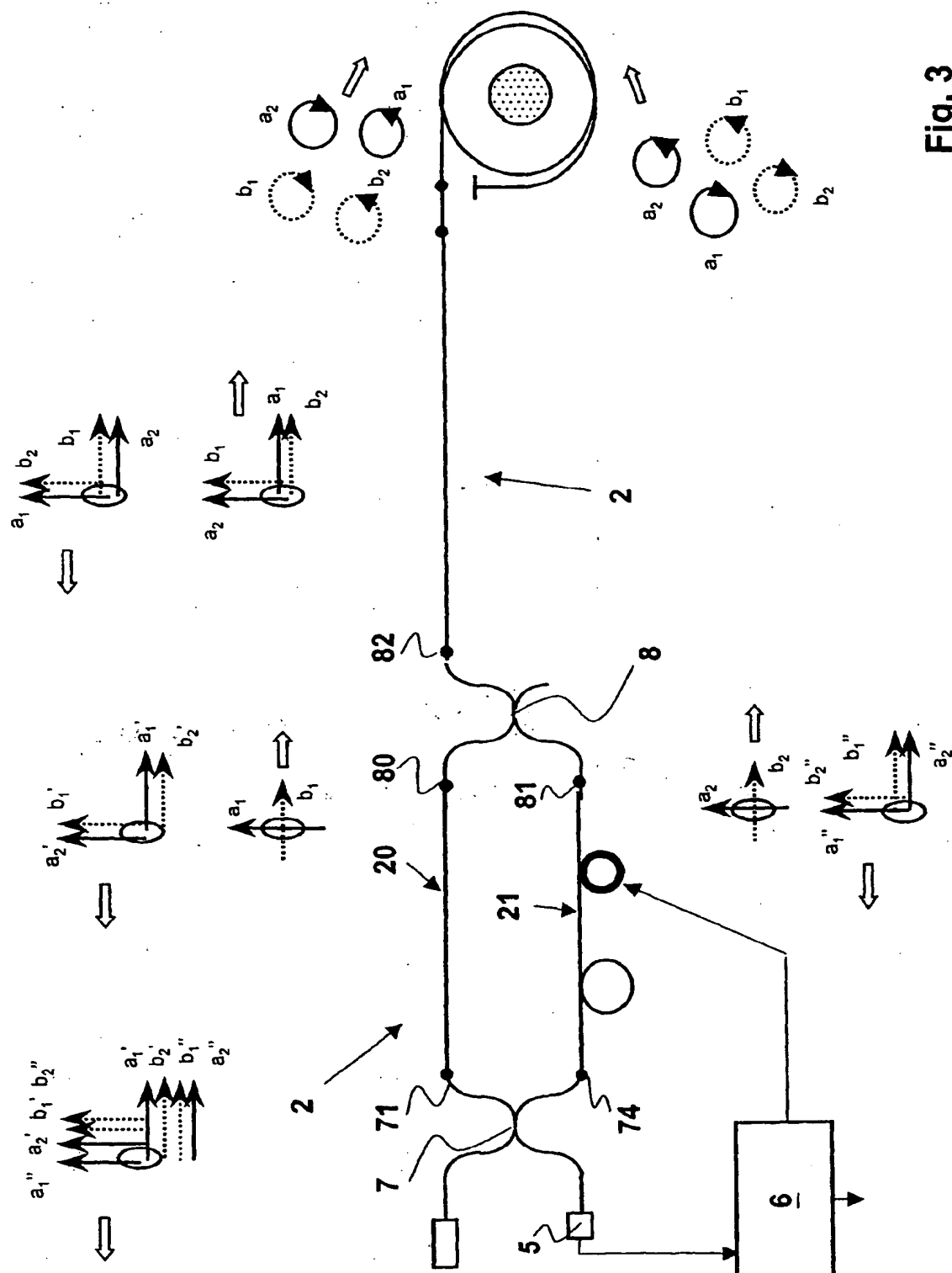


Fig. 2



**Fig. 3**

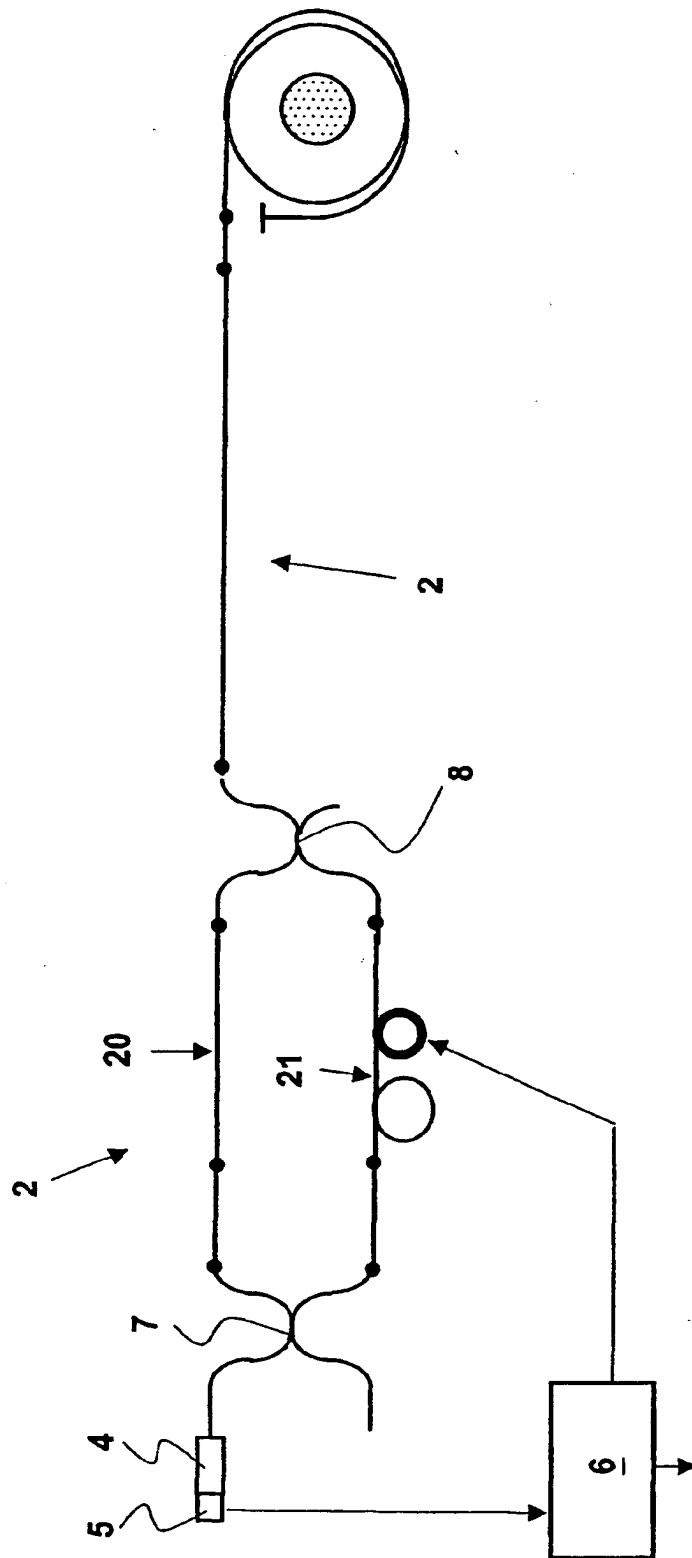


Fig. 4

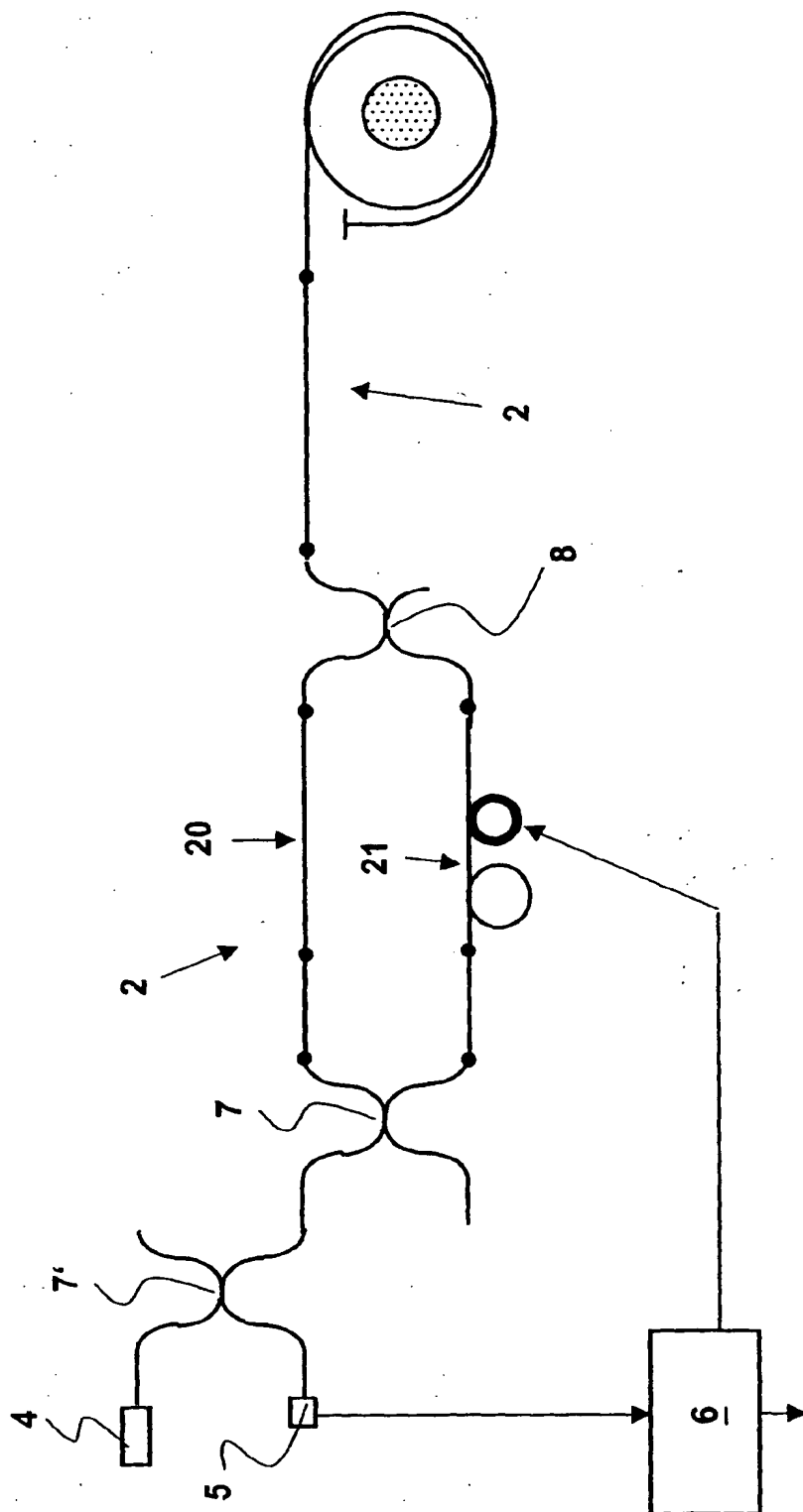


Fig. 5

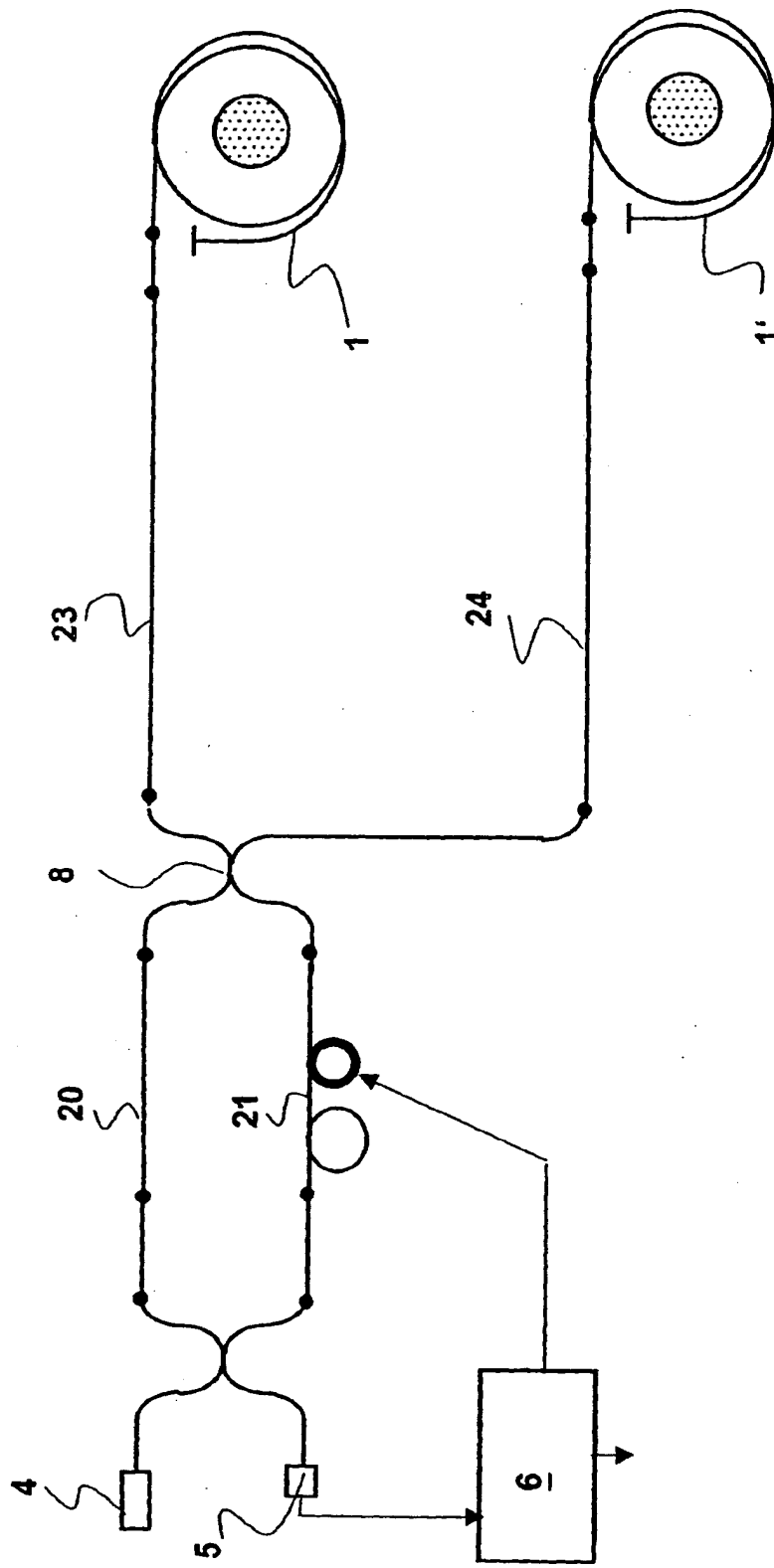
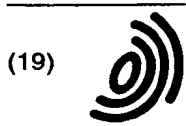


Fig. 6



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) EP 1 154 278 A3

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(88) Veröffentlichungstag A3:  
09.04.2003 Patentblatt 2003/15

(51) Int Cl.7: G01R 15/24

(43) Veröffentlichungstag A2:  
14.11.2001 Patentblatt 2001/46

(21) Anmeldenummer: 01810364.8

(22) Anmeldetag: 12.04.2001

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE TR  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder: Bohnert, Klaus  
5452 Oberrohrdorf (CH)

(74) Vertreter: ABB Patent Attorneys  
c/o ABB Schweiz AG  
Brown Boveri Strasse 6  
5400 Baden (CH)

(30) Priorität: 05.05.2000 DE 10021669

(71) Anmelder: ABB RESEARCH LTD.  
8050 Zürich (CH)

(54) **Faseroptischer Stromsensor**

(57) Ein faseroptischer Stromsensor weist ein Reflexionsinterferometer mit einer faseroptischen Zuleitung (2) und eine spulenförmige optische Sensorfaser (1) auf, wobei die Sensorfaser (1) an einem ersten Ende mit der faseroptischen Zuleitung (2) verbunden und an einem zweiten, freien Ende mit einem Reflektor (10) versehen ist. Die faseroptische Zuleitung (2) weist zwei Faserzweige (20,21) auf, welche einen detektorseitigen und einen sensorseitigen polarisationserhaltenden Koppler (7,8) miteinander verbinden. Ein Phasenmodulator (9) zur Modulation von differentiellen Phasen zweier

er in der Zuleitungsfaser (2) propagierender polarisierter Wellen ist in einem dieser zwei Faserzweige (20,21) angeordnet, wobei er die differentielle Phase zweier parallel zueinander polarisierter Wellen moduliert. In einem der zwei Faserzweige (20) ist ferner ein Mittel zur Änderung der Polarisationsrichtung (80) vorhanden, so dass in einem dem sensorseitigen Koppler (8) anschliessenden Segment (22) der Zuleitungsfaser (2) optische Wellen mit orthogonal linearen Polarisationen propagieren. Dadurch lassen sich die Vorteile des Reflexionsinterferometers mit denjenigen eines Sagnac-Interferometers verbinden.

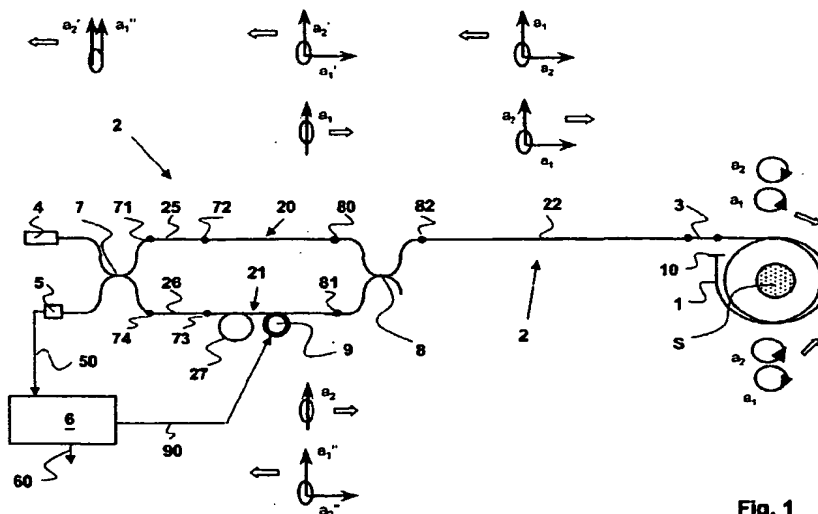


Fig. 1

EP 1 154 278 A3



Europäisches  
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 01 81 0364

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
A	US 5 953 121 A (BOHNERT KLAUS ET AL) 14. September 1999 (1999-09-14) * Spalte 3; Abbildung 1 * * Spalte 5, Zeile 53 - Spalte 6, Zeile 36; Anspruch 1; Abbildung 4 *	1,2	G01R15/24
A	WO 98 58268 A (TEXAS A & M UNIVERSITY SYST) 23. Dezember 1998 (1998-12-23) * Seite 1, Zeile 8 - Seite 1, Zeile 11 * * Seite 4, Zeile 6 - Zeile 27; Abbildung 1 * * Seite 8, Zeile 26 - Seite 9, Zeile 31; Anspruch 1; Abbildung 2 *	1,2	
A,D	DE 42 24 190 A (ABB RESEARCH LTD) 27. Januar 1994 (1994-01-27) * Spalte 1, Zeile 6 - Zeile 20 * * Spalte 2, Zeile 48 - Zeile 60 * * Spalte 4, Zeile 24 - Zeile 45; Anspruch 1; Abbildung 3 *	1,2	
A	DONATI S ET AL: "MAGNETO-OPTICAL FIBRE SENSORS FOR ELECTRICAL INDUSTRY: ANALYSIS OF PERFORMANCES", IEE PROCEEDINGS J. OPTOELECTRONICS, INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, STEVENAGE, GB, VOL. 135, NR. 5, PART J, PAGE(S) 372-382 XP000027004 ISSN: 0267-3932 * Seite 372, linke Spalte, Absatz 1 * * Seite 376, linke Spalte, Zeile 52 - Seite 377, linke Spalte, Zeile 56; Abbildung 6 *	1,2,4	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.7) G01R G02F G01J G02B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>BERLIN</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>12. Februar 2003</b>	
		Prüfer <b>Prasse, T</b>	
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.92 (P04-C03)



**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 01 81 0364

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.  
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

12-02-2003

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5953121 A	14-09-1999	DE 19703128 A1	06-08-1998
		DE 59708256 D1	24-10-2002
		EP 0856737 A1	05-08-1998
WO 9858268 A	23-12-1998	US 6023331 A	08-02-2000
		AU 8143098 A	04-01-1999
		WO 9858268 A1	23-12-1998
DE 4224190 A	27-01-1994	DE 4224190 A1	27-01-1994
		CH 686744 A5	14-06-1996

EPO FORM P0481

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**